

複数管から放出された水平重力噴流に関する数値シミュレーション

Numerical Simulation of a Horizontal Buoyant Jet Discharged from a Multiple Pipe

坪野考樹* 仲敷憲和** 松梨史郎* 坂井伸一* 丸山康樹**

By Takaki Tsubono, Norikazu Nakashiki, Shiro Matsunashi,
Shin'ichi Sakai and Kouki Maruyama

The diffusion behavior of a horizontal buoyant jet discharged from a multiple pipe was investigated both experimentally and numerically. Velocity and temperature of the jet were measured with FLV, thermocouples and propeller velocimeters, changing the number of pipe and the height of an outlet and the distance between the pipes. In each cases, a three-dimensional turbulence closure model ($k-\epsilon$ model) was applied to simulate the behavior of the jets. The performance of the three-dimensional model was evaluated by the comparison of the numerical results with the experimental measurements.

Keywords: horizontal buoyant jet, multiple pipe,
numerical simulation, $k-\epsilon$ model

1. まえがき

一般に、発電所から水中放水方式で水平に放水された温排水は、放水口近傍では重力噴流として振る舞い、周囲水と混合・希釈されながら浮力により海表面へと到達し、拡散する。また、水中放水方式では、複数管から温排水を放水しているため、放水口近傍では温排水噴流は近接する各噴流による相互作用をうけ、連行量等が抑制され複雑な拡散挙動を示す。従来、このような3次元のかつ複雑な温排水の拡散挙動を把握するための研究としては、水理実験等が多く適用されてきたが、近年の計算機の高速度・大容量化、また計算技術の進歩に伴い、3次元数値モデルを用いて計算することが可能になってきた。前報¹⁾では、重力噴流の希釈・混合過程を把握するために、単管から放水される噴流について実験を行い、放水口での内部フルード数と底面から放水口までの高さによって、噴流が重力噴流として浮上して拡散するパターンと、浮上せずに底面付近で拡散・希釈するパターンに分類し、乱流モデル($k-\epsilon$ モデル)²⁾を用いて、水温や流速の平均量および噴流の浮上経路等が計算できることを示した。

本研究では、このモデルを複数管から放水される重力噴流に適用し、噴流が重合し複雑な挙動を示す領域や近接する噴流によって連行量が抑制される様な領域における水温や流速の分布等の再現性について検討を行った。まず、放水口の高さおよび内部フルード数を変えて、2管から放水した場合の実験を行い、放水口近傍での流速分布、水温分布について測定を行った。つぎに、4管から放水した場合の実験を行った。これらの実験について計算を行い、2管から放水された噴流においては、浮上するまでの放水口近傍の流速および水温の平均量の分布について、また4管から放水された噴流においては、放水口から水表面

*正会員 (工修) **正会員 (工博) * 電力中央研究所 我孫子研究所 環境科学部 海洋科学グループ

に浮上して拡散するまでの広い領域の流速や水温の分布の再現性について検討を行った。

2. 水理実験と数値モデルの概要

2-1 実験装置と実験方法

図-1に、2管から放水された噴流の実験に用いた装置の概略を示す。実験に使用した水路は、長さ10m、幅1m、高さ1mであり、レーザードップラー流速計による計測を行うため、両側面は透明なガラス製の材質にした。本実験では、水路内に仕切り板を設置して、測定区間を長さ6m、幅0.7mの水路として使用した。また、排水の影響が及ばない水路下流端より、放水量と同量の排水を行った。これにより、測定時間および区間内では、流速分布や温度分布はほぼ一定に保たれて、現象は準定常とみなすことが出来る。水温の計測には熱電対を用い、流速の測定にはレーザードップラー流速計を用い、水温および流速を同時に測定した。なお、測定は、現象が2放水口の中心軸上に対して対称なため、2管の中心軸を含めた片側の噴流についてのみ行った。図-2に、放水口の概略および座標系の定義を、表-1に実験条件を示す。2本の放水口から放水される噴流の実験では、水深を20cm、放水口径 $d=1.9\text{cm}$ をとし、放水口の底面からの高さ H および内部フルード数 Fro を変化させ、重力噴流として拡散するケースA1と底面に沿って拡散するケースA2の2つのケースについて実験を行った。

4管から放水される噴流の実験では、流量が2管の実験と比べて大きく、噴流の拡散範囲が大きくなるため、長さ24m、幅16m、高さ0.6mのコンクリート製の水槽を用いた。噴流の拡散範囲が定常状態になった後、サーミスタ水温計を測定枠に設置し、測定枠を移動して水面下0.5cmから水深方向に1cm間隔で水温を測定した。また、プロベラ流速計を用いて、噴流の中心軸上を放水口から沖合いに、水面下0.5cmから1cm間隔で水深方向に流速を測定した。4管から放水される噴流の実験では、水深を15cm、放水口径 $d=(2\text{cm})^*$ をとして、2放水口の場合と同様に、放水口の底面からの高さ H を変えることによって、重力噴流として拡散するケースB1と底面に沿って拡散するケースB2の2つのケースについて実験を行った。

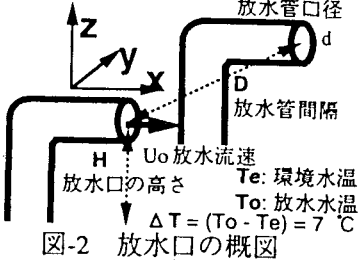
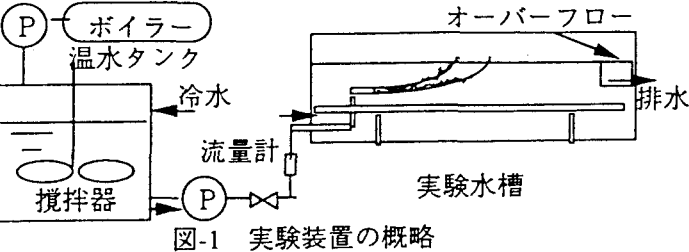


表-1 実験条件

実験 ケース	放水 管数	放水口の高さH	放水管間隔D	放水流速	内部フルード数
		H/d	D/d	Uo(cm/s)	Fro
A1	2	3	5	23.3	11.0
A2	2	2	5	46.2	22.0
B1	4	3	3	35.0	19.2
B2	4	1	3	35.0	19.2

2-2 数値モデルの概要

本研究では、複数管から放水された水平重力噴流の拡散を検討するため、3次元の乱流モデル (k-ε モデル) ¹⁾を用いた。基礎式は、以下のとおりである。

質量保存式 : $\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$ - (1)

運動量保存式 : $\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right)$ - (2)

$$k \text{ の保存式} : \frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_k \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k + P_b - \epsilon \quad (3)$$

$$\epsilon \text{ の保存式} : \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(C_{\epsilon} \frac{k^2}{\epsilon} + \nu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon + C_{\epsilon 3} P_b) \quad (4)$$

$$T \text{ の保存式} : \frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial x_j} - \overline{\theta u_j} \right) \quad (5)$$

$$P_k = -\overline{u_i u_j} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, \quad P_b = -\beta g_i \overline{u_j \theta}, \quad -\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k, \quad -\overline{\theta u_j} = \alpha_t \frac{\partial T}{\partial x_j},$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad \alpha_t = \frac{C_\mu}{Pr_t} \frac{k^2}{\epsilon} = \frac{\nu_t}{Pr_t} \quad C_k = 0.09, C_\mu = 0.09, C_\epsilon = 0.07, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92, C_{\epsilon 3} = 1.40$$

ここに、 U_i :各方向の流速、 p :圧力、 k :乱れエネルギー、 ϵ :散逸率、 T :温度、 $\overline{u_i u_j}$:レイノルズストレス、 P_k, P_b :生成項、 ν, ν_t :粘性係数(添字 t は動粘性係数)、 α, α_t :拡散係数、 ρ :密度、 β :熱膨張係数である。

本計算では、主として放水された重力噴流が浮上するまでの領域を計算対象としており、運動量の効果が卓越しているため密度分布の効果は運動方程式中のみ考慮した。基礎方程式は、水平方向にも鉛直方向にも不等間隔の直交格子を用いて、スタッガード配置による有限差分法により離散化した。例えばケースB1の場合、メッシュ幅を x 方向に1.57cm~40.01cm、 y 方向に1.57cm~34.9cmおよび z 方向に1cmの直行格子(52×47×17)を用いた。その際、運動方程式の移流項、拡散項およびスカラー量の拡散項には中心差分を、水温などのスカラー量の移流項には1次の風上差分を採用した。圧力の計算は、水面を固定してHSMAC法に基づき、流速場が連続式を満たすように補正した。図-3に、今回、計算を行った際の境界条件を示す。

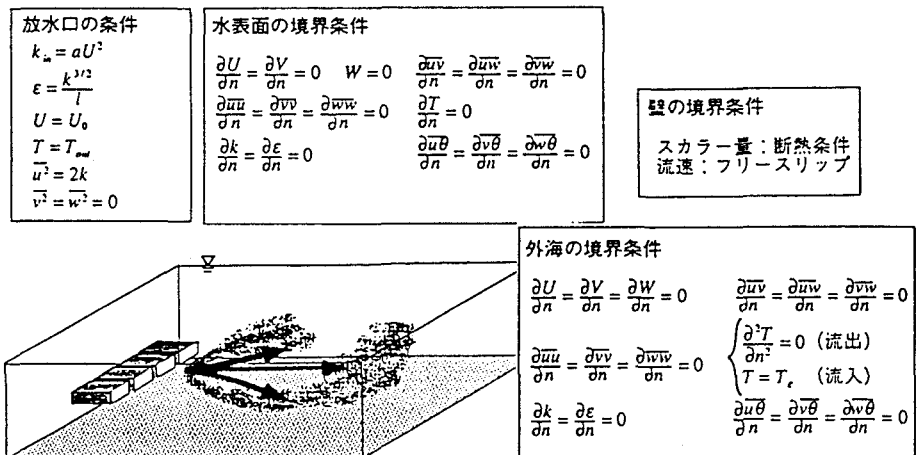


図-3 境界条件

3. 結果と考察

3-1 2管から放水される噴流

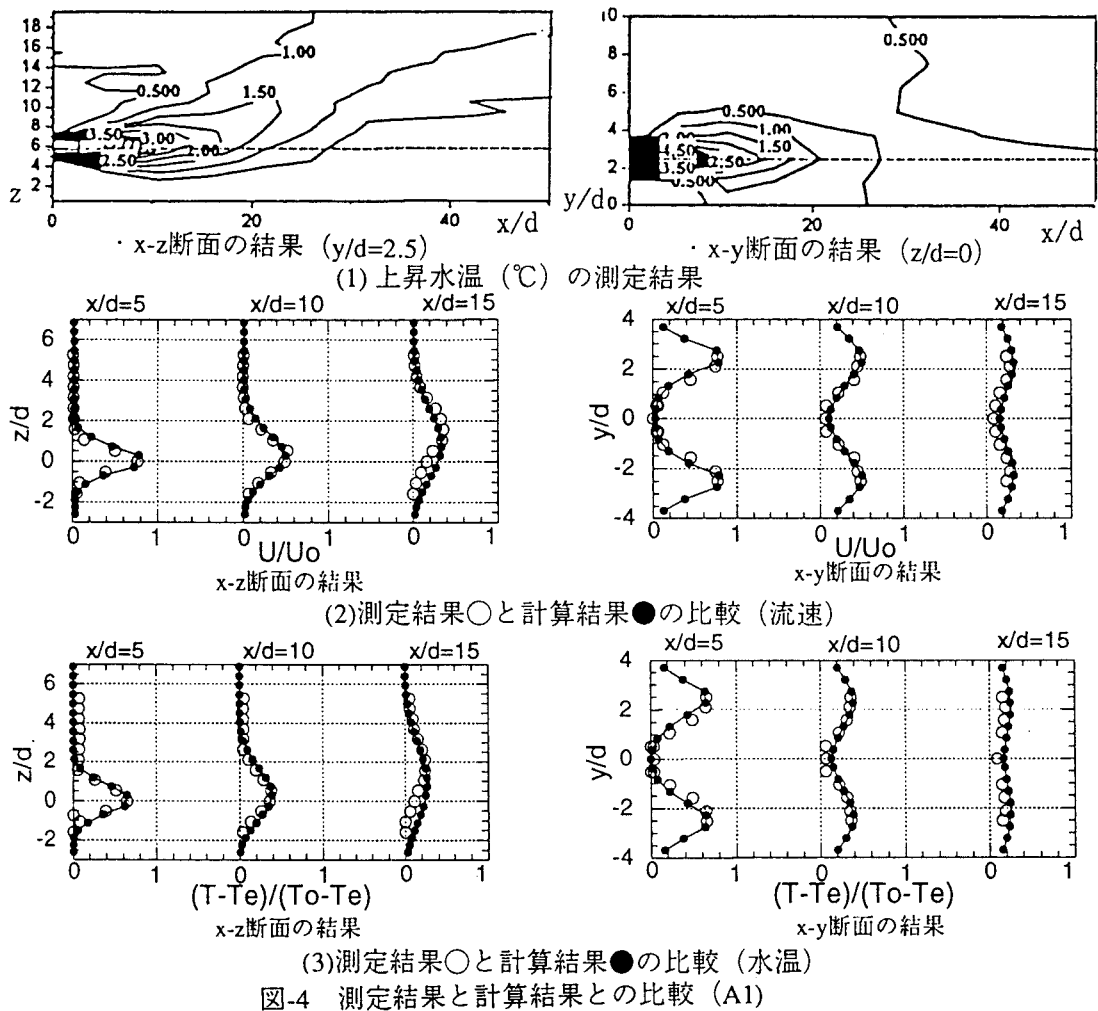
(a)実験結果

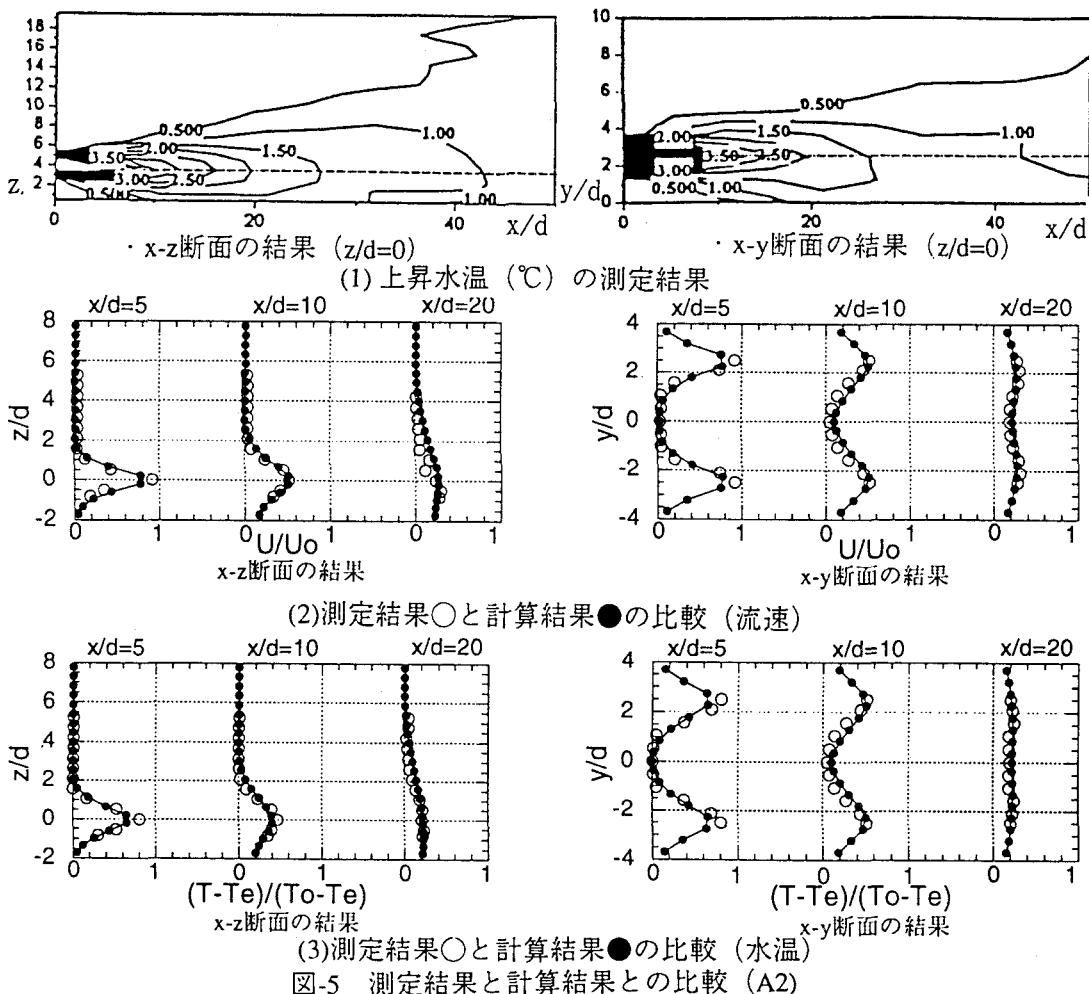
図4(1)、図5(1)に、それぞれケースA1、ケースA2における放水口中心軸上の鉛直(x - z)断面および水平(x - y)断面の上昇水温の測定結果を示す。水平(x - y)断面については現象が対称なため、2管の中心から片側のみを示した。また、水平断面については、 $y/d=0$ が2放水口の中心となる。ケースA1は底面の影響が小さい場合であり、噴流は水平重力噴流として希釈・拡散する。ケースA2は放水口が底面に近く、底面によって噴流下部からの連行が抑えられているため、噴流は底面をほうように希釈・拡散していく。また、

ケースA1、A2の水平（x-y）断面をみると、2放水口の内側では近隣する噴流によって連行が抑制されるため、2放水口の外側に比べて内側の方が温度の低減が小さく、また噴流が縮流していく様子がわかる。

(b)計算結果

ケースA1、A2における流速、水温の測定結果と計算結果を、図4(2)、4(3)、5(2)、5(3)に示す。各図は、無次元化された流下方向距離（ $x/d=5、10、15$ (または 20)）での分布であり、○は測定結果を●は計算結果を示している。図4(2)、5(2)に流速分布および図4(3)、5(3)に温度分布のx-z断面（左図）、x-y断面（右図）を示す。流速、水温は、それぞれ初期流速、環境水温と放水水温の差により無次元化した。また、x-z断面、x-y断面は放水口前面（ $y/d=0、z/d=0$ ）上の各平均量の分布を示す。両断面（x-z断面およびx-y断面）の結果を見ると、噴流が水平重力噴流として希釈・拡散するケースA1、および放水口が底面に近く、噴流が底面をはうように希釈・拡散していくケースA2について、計算結果は測定結果と定量的によく一致していることが分かる。特に、2つの噴流が相互干渉する位置での流速および水温の平均値について、計算結果は測定結果と定量的に一致している。複数管より放水される水平重力噴流については、放水口近傍での各噴流の重合域や噴流縮流域において複雑な拡散現象を示し、従来平均値モデル等の手法では噴流内の渦動粘性係数や渦動拡散係数が推定できず、数値モデルの適用が困難であった。本乱流モデルは、このような複雑な現象に対しても、流速、水温を精度良く計算できることが分かった。





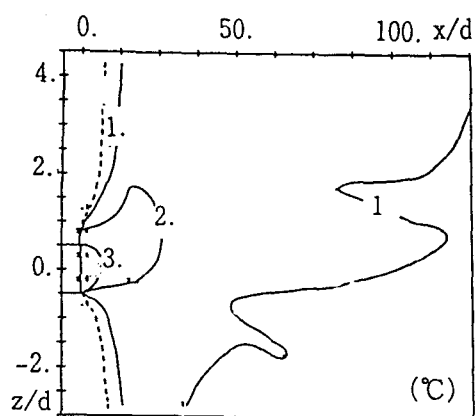
3-2 4管から放水される噴流

(a) 実験結果

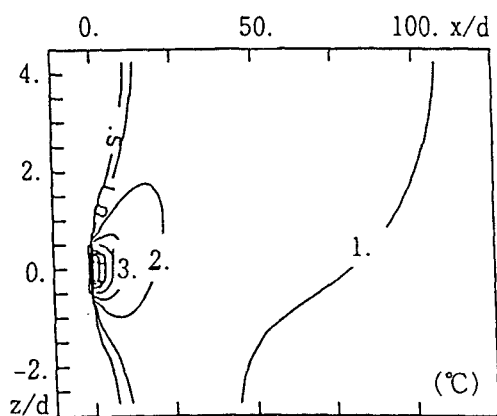
図6、7左図に、B1、B2における流速、水温分布の測定結果を示す。各図の(1)、(2)に、4管の中心軸上 ($y/d=0$) での x-z 断面の流速、上昇水温分布を、各図の(3)に水面下 $1/4d$ の位置での x-y 断面の上昇水温分布を示す。B1は、海底面の影響が小さい場合であり、流速および上昇水温の鉛直分布の図から、噴流は水平重力噴流として希釈・拡散され、浮上していく様子がわかる。B2は、底面の影響が顕著な場合であり、噴流は底面により連行を抑制され底面をほうように希釈・拡散する。底面によって連行を抑えられるため、放水口近傍の温度の鉛直分布をみると、2、3°Cの領域がB1に比べて大きくなっている。B1の場合には、噴流が放水口付近からすぐに浮上するのに対し、B2の場合には、噴流が底面から浮上し始める位置が流下方向に移動し、浮上し始めるまでに底面近くで温度が低減するため、表層における1°Cの範囲はB1の場合に比べて若干小さくなる。

(b) 計算結果

ケースB1、ケースB2における噴流の計算結果を、図6、7の右図に示す。ケースB1およびケースB2ともに、計算された流速、水温の全体的な鉛直分布や、噴流の浮上する経路およびコンターの間隔は測定結果とよく一致している。表層での温度分布の計算結果は、定性的には測定結果と一致しているが、両ケースにおいて、測定結果に比べて1°Cの上昇域が小さくなる傾向にある。鉛直分布の図をみると、噴流が水面に浮上し、拡散していく領域において、上昇水温の計算結果が測定結果に比べて鉛直方向に厚く広がっており、そのために計算結果の上昇域が測定結果に比

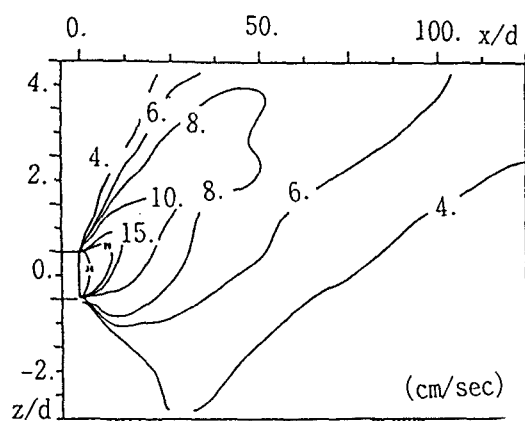


測定結果

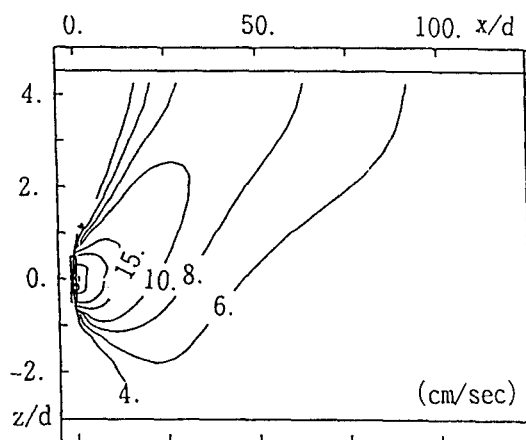


計算結果

(1) 上昇水温の分布の比較 (4管の中心軸上のx-z断面)

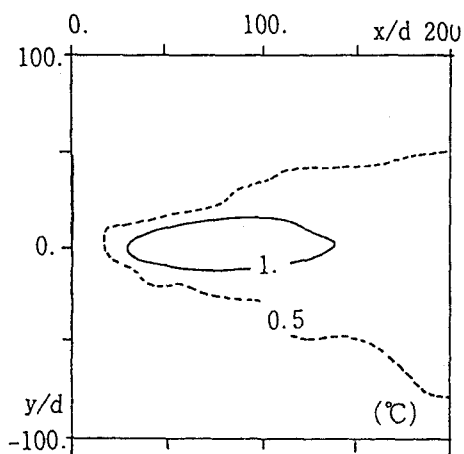


測定結果

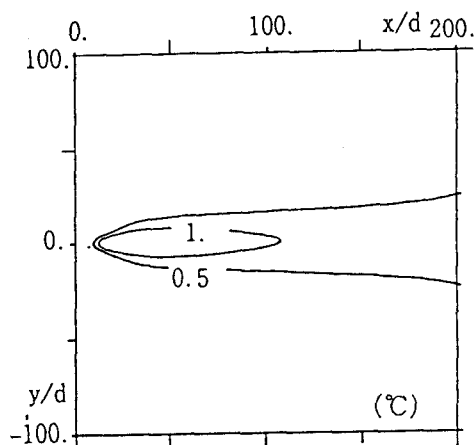


計算結果

(2) 流速分布の比較 (4管の中心軸上のx-z断面)



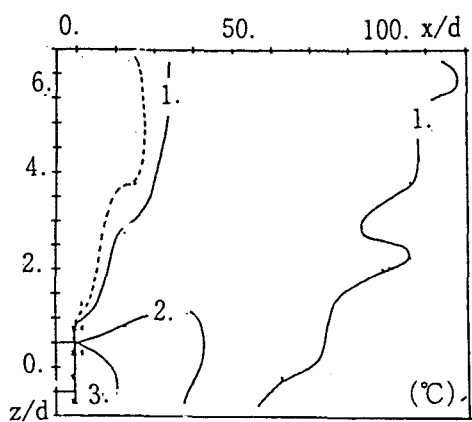
測定結果



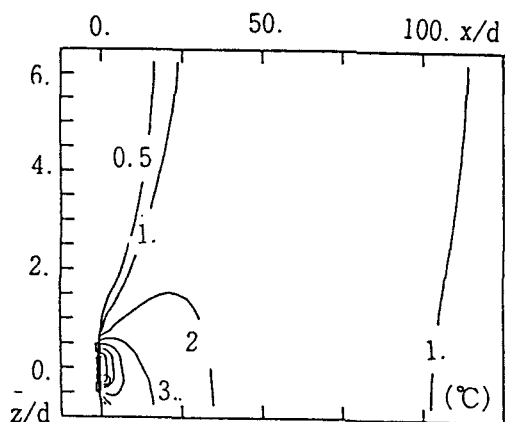
計算結果

(3) 表層における水温分布の比較 (水面下1/4dのx-y断面)

図-6 測定結果と計算結果の比較 (B1)

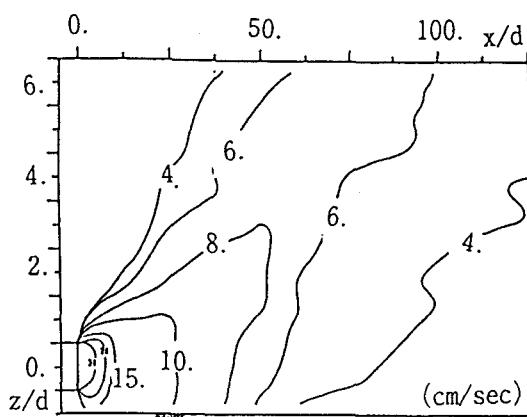


測定結果

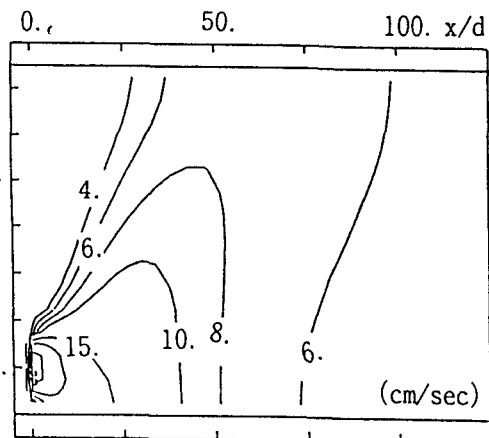


計算結果

(1) 上昇水温の分布の比較 (4管の中心軸上のx-z断面)

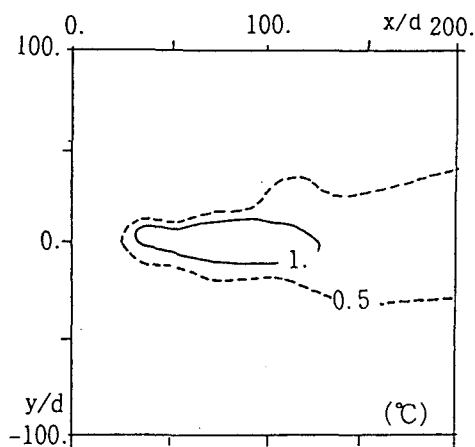


測定結果

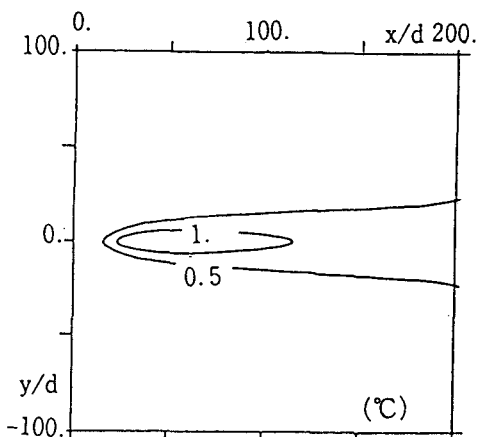


計算結果

(2) 流速分布の比較 (4管の中心軸上のx-z断面)



測定結果



計算結果

(3) 表層における水温分布の比較 (水面下1/4dのx-y断面)

図-7 測定結果と計算結果の比較 (B2)

べて小さくなったと思われる。噴流が水面に浮上した後の表層近くの領域の取扱い、今後の課題である。

4. まとめ

複数管から水平方向に放水された重力噴流について水理実験を行い流速、水温の平均量の分布を測定した。また、3次元乱流モデルを適用して計算した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 2管から放水された噴流の場合には、放水口近傍から浮上するまでの領域において、計算された浮上経路や水温、流速分布は測定結果とよく一致しており、底面の影響や各噴流間の相互作用についてもモデルは妥当なものと考えられる。特に、2つの噴流が相互干渉する位置の流速および水温の平均値についても、計算結果は測定結果と定量的に一致しており、本モデルは、運動量の卓越する浮上するまでの放水口近傍において、2管から放水される噴流の流速および温度を、精度よく計算できることが分かった。
- (2) 4管から放水される噴流の場合には、流速および水温の平均値、水温の到達点および浮上点について、計算結果は測定結果と定性的に一致した。しかしながら、どの条件においても表層での計算結果は測定結果に比べて横断方向に小さくなる傾向があり、噴流が水面に浮上し、拡散していく表層近くの領域のモデルでの取扱いは今後の課題である。

今後は、周囲水に流動や成層がある場合について、検討を行う予定である。なお、4管から放水される噴流の研究については、資源エネルギー庁受託「環境影響評価技術等実証調査」により実施した成果である。本研究に関して貴重なご意見やご指摘を頂いた関係者の方々には、深く感謝の意を表します。

参考文献

1. 仲敷憲和、松梨史郎、坂井伸一、丸山康樹、水工学論文集 第40 pp.537-542
2. Chen, C. J., 田中伸和、乱流モデルの基礎と応用、構造計画研究所刊、1992